

文章编号: 0258-7025(2010)04-1088-05

激光脉冲宽度对长脉冲激光能量在线测量装置的影响

魏继锋 关有光 周山 彭勇 胡晓阳 张凯

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 长脉冲激光能量在线测量装置中热桥的存在加剧了热传导的影响,为了定量地确定其大小并对其进行修正开展了此项研究。将温升曲线分成 3 部分,利用傅里叶定律、热传导方程及能量守恒定律对每一部分逐一进行了分析,得到能量损失的比例与装置参数之间的关系,开展了实验研究,通过对实验数据的拟合,结果表明,热损失比率由脉冲宽度、材料的导热系数、热桥的长度、吸收体的质量等决定。上述参数需根据实验间隔及测量精度要求确定,推导出来的理论值与实验结果一致性较好,其偏差为 2.9%。

关键词 测量;激光能量;在线测量装置;热传导;补偿

中图分类号 O348.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103704.1088

Effect to Online Energy Measurement Device for Long-Pulse Laser by Laser Pulse Width

Wei Jifeng Guan Youguang Zhou Shan Peng Yong Hu Xiaoyang Zhang Kai

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Heat bridge in the online energy measurement device for long-pulse laser enhances heat conduction effect. The research was done to assure the value of the effect on measurement result so as to correct the measurement result. Curves of temperature was divided into three parts, each part was analyzed with Fourier heat law, heat conduction equations and energy conservation law. Relationship between energy loss and device parameter was obtained, and experiment research was done. Experiment data was fitted and conclusion was drawn: heat loss rate is decided by pulse length, heat conduction coefficient of material, length of heat bridge, quality of heat absorption body, and *et al.*. These parameters are decided according to experiment interval and precision requirement. Theory value and experiment result have a good coherence. Its deviation is 2.9%.

Key words measurement; laser energy; online measurement device; heat conduction; compensate

1 引言

在激光器研制和使用过程中,经常需要实时地测量激光的功率能量,其中最为便捷的方法是在线测试,即从主光束中部分取样,然后对取样得到的光束进行测量,最常用的取样方法是分光镜分光取样法^[1~3]。根据不同的激光类型可选择不同的测试设

备,对于连续光通常采用功率计监测激光功率,对于连续脉冲光通常采用脉冲能量计监测激光能量,对于高能激光,由于能量较高,激光束通常为单脉冲,而且脉冲宽度也比较宽,一般在秒量级,最高可达到数十秒,因此其能量通常采用长脉冲能量在线测量装置监测^[4]。高能激光的脉冲宽度变化范围较大,

收稿日期: 2009-05-26; 收到修改稿日期: 2009-06-26

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 魏继锋(1980—),男,硕士研究生,工程师,主要从事激光参数诊断技术方面的研究。

E-mail: wjfc02000@163.com

导师简介: 张凯(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光物理、激光技术及光电子技术等方面的研究。

E-mail: zhangkai217@sohu.com

跨度在一个量级左右,因此必然对热量的损失造成较大的影响。本文结合激光能量在线测量装置的原理以及结构特点,分析了吸收体在激光脉冲作用时以及激光脉冲结束后的温度场特性,得到了其热损失规律,并对测量的总能量进行补偿。

2 长脉冲激光能量在线测量装置的结构原理

长脉冲激光能量在线测量装置的典型结构示意图如图 1 所示^[5]。

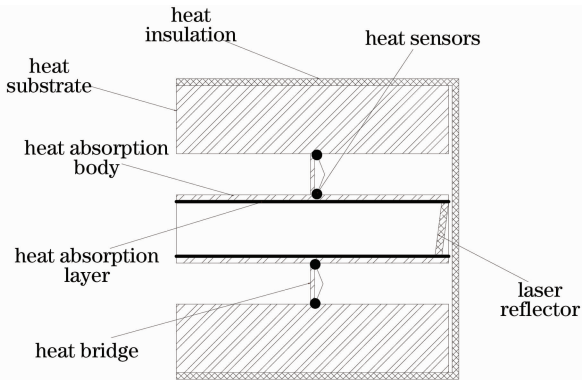


图 1 激光能量在线测量装置结构示意图

Fig. 1 Construction schematic of laser energy online measurement device

由图 1 可以看出,典型的激光能量在线测量装置通常由吸收体、热桥、热沉、热电传感器、绝热层等几部分组成。其中吸收体的作用是吸收激光,通常为了提高激光吸收率会在吸收体内表面覆盖一层黑体或者漫反射材料,如果光斑的尺寸较大,与吸收体的口径不匹配时,通常在装置前端还会加入一个光学缩束系统,吸收体通常质量较小,而且采用高热导率材料制成,具有较大的响应度和较短的响应时间;热电传感器用来测量吸收体温差变化,为了获得较高的响应度,热电传感器通常选用热电堆,其热端紧密地贴合在吸收体外表面,冷端紧密贴合在热沉上;热沉质量较大,采用高热导率材料加工而成,可保证热电传感器冷端温度恒定,这样温度传感器所测得的温度变化就直接反映吸收体外表面的温度变化;热桥位于吸收体和热沉之间,作用是加快吸收体的冷却速度,缩短两次实验之间的间隔。与吸收体相比热桥横向宽度要窄得多,这样可以控制实验过程中的热量损失;绝热层采用热导率很小的材料制成,它的主要作用是降低环境因素对测量结果的影响。为了提高激光吸收率,在图 1 的吸收体后端还加入一块高反镜,高反镜与吸收体内表面成一定角度放

置,增加激光在吸收体内的反射次数。

一般的激光能量测量装置能量计算表达式为^[6]

$$E = c_1 \Delta T_{\max}, \quad (1)$$

式中 E 为激光能量; ΔT_{\max} 为最大温升; c_1 为比例常数。如果考虑热量损失时,(1)式变为

$$E = c_1 \Delta T_{\max} + Q_1, \quad (2)$$

式中 Q_1 为热量损失。 Q_1 又包括 3 项:热辐射损失(Q_e)、热对流损失(Q_{e1})和热传导损失(Q_{e2}),其关系为

$$Q_1 = Q_e + Q_{e1} + Q_{e2}. \quad (3)$$

由于取样比例通常很小,入射到能量在线测量装置中的能量往往很低,同时考虑到整个吸收体封闭在装置内部,因此热辐射以及与外界的对流都很小,而由于热桥的存在,将大大加强热传导的影响,对于长脉冲激光能量在线测量装置而言,热传导的影响远大于热辐射以及对流的影响,因此可得到

$$E \approx c_1 \Delta T_{\max} + Q_{e2}. \quad (4)$$

影响热传导的因素较多,包括初始条件、吸收体的形状、激光的脉宽等,但最关心的是这种影响是否会对测量结果造成影响,造成多大影响,下面将针对整个过程的特点分析脉冲宽度对测量结果造成的各种影响。

3 长脉冲激光能量在线测量装置的作用过程及机理分析

当一束脉宽为 5 s 的矩形长脉冲入射到激光能量在线测量装置中时,所测得的温升曲线如图 2 所示。

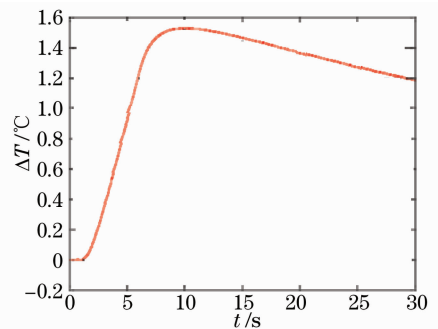


图 2 长脉冲作用下典型的温度响应曲线

Fig. 2 Typical temperature figure by long pulse laser

由图 2 可以看出,整个曲线可以分成 3 段:激光与吸收体作用的上升段、激光作用后的动态调节段以及热平衡后的下降段。

在上升段及动态调节段,由于吸收体横向尺寸远大于加热深度,因此在整个作用过程中可用一维热传导方程近似表述三维热传导方程,同时考虑到入射能量比热损失大得多,为了使问题简化,可认为

在激光脉冲作用时间内吸收体为绝热状态,则其传导方程为^[7,8]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (5)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -P_0 \gamma, \quad (6)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \quad (7)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad (8)$$

式中 α 为材料的热扩散率,且 $\alpha = k/(\rho c)$,其中 k 为导热系数, ρ 为密度, c 为比热。 l 为吸收体厚度, γ 为吸收层表面吸收率, P_0 为激光平均功率, T_0 为环境温度(即热沉的初始温度)。

利用分离变量法及傅里叶级数法,上升段吸收体前后两个表面(分别对应图 1 中吸收体的激光吸收层和热电传感器的热端紧贴表面)温差为^[9]

$$\Delta T(x, t) = T(0, t) - T(l, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\gamma P_0 l}{n^2 \pi^2 K} [1 - (-1)^n] \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \alpha t\right] \left\{ \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \alpha t_{\text{end}}\right] + 1 \right\}, \quad (10)$$

式中 t_{end} 为激光辐照停止时间。由(10)式可以看出,激光脉冲结束后前后表面温差变化非常接近负指数变化规律,因此温差迅速减小为零,也就是说动态调节段时间很短,设上升段时间(即脉冲宽度)为 t_u ,动态调节段时间为 t_d ,从吸收体热量增加到吸收体温升达到最大所需时间为 t_{max} ,则可得到

$$t_{\text{max}} = t_u + t_d \approx t_u. \quad (11)$$

在上升段,考虑到吸收体吸收的能量比损失的能量大得多,为了使问题简化可认为在激光脉冲作用时间内吸收体为绝热状态,则由能量守恒得到上升段吸收体温升 ΔT 的表达式为

$$\Delta T = T - T_0 = P_0 \gamma (t - t_0) / (mc), \quad (12)$$

式中 T 为吸收体温升, m 为吸收体质量, c 为吸收体及热桥材料比热, t_0 为激光辐照时刻, t 为上升段任意时刻。

将(12)式对时间积分,积分上下限分别取 t, t_0 ,可得

$$\int_{t_0}^t (T - T_0) dt = \frac{P_0 \gamma}{2mc} (t - t_0)^2 \approx \frac{1}{2} (t - t_0) \Delta T_t, \quad (13)$$

式中 ΔT_t 为 t 时刻吸收体的温升。

以热桥为研究对象,设吸收体、热桥以及热沉的

$$\Delta T(t) = T(0, t) - T(l, t) = \frac{\gamma P_0 l}{2K} +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\gamma P_0 l}{n^2 \pi^2 K} [1 - (-1)^n] \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \alpha t\right]. \quad (9)$$

(9)式中级数部分按指数衰减,迅速衰减为 0,只剩下第一项,因此在激光加热过程中,吸收体内表面和外表面之间的温度差 $\Delta T(t)$ 几乎为一个常量,该量值与激光功率 P_0 和吸收体厚度 l 成正比,与热传导系数 K 成反比,考虑到 P_0 很小,通常为几瓦至几十瓦, l 的厚度通常只有几毫米, K 则比较大,因此 $\Delta T(t)$ 往往很小,几乎可以忽略,整个吸收体温度可以认为是均匀的。

当激光脉冲作用结束后,吸收体前后表面(分别对应图 1 中吸收体的激光吸收层和热电传感器的热端紧贴表面)温差为^[9]

初始温度均为 T_0 ,热桥的长度为 L ,热桥的截面积为 A ,吸收体外表面温度为 T_1 ,则由傅里叶定律得到热量损失为^[7]

$$Q_l = \int_{t_0}^{t_1} \frac{KA}{l} (T_1 - T_0) dt = \frac{KA}{l} \int_{t_0}^{t_1} (T_1 - T_0) dt, \quad (14)$$

式中 t_1 为温差达到最大的时刻。

将(13)式代入(14)式得

$$Q_l = \frac{KA}{2l} (t_1 - t_0) \Delta T_{\text{max}} = \frac{KA}{2l} t_{\text{max}} \Delta T_{\text{max}} = \frac{KA}{2l} t_u \Delta T_{\text{max}}. \quad (15)$$

设热传导损失的能量与总入射的总能量的比值为 u ,衰减系数 $\tau = \frac{kA}{mcl}$,则由(12)式及(15)式得

$$u = \frac{Q_l}{mc \Delta T_{\text{max}}} = \frac{kA}{2mcl} t_u = \frac{1}{2} \tau t_u. \quad (16)$$

在下降段,激光功率 $P_0 = 0$,由傅里叶定律及能量守恒定律得^[7]

$$\int_{t_1}^t \frac{KA}{l} (T_1 - T_0) dt = -mc (T_{\text{max}} - T). \quad (17)$$

对(17)式等式两边求导,并解上述微分方程,同时结合边界条件 $t = t_0$ 时, $T = T_{\text{max}}$ 得到方程的解为

$$\Delta T = T(t) - T_0 = (T_{\max} - T_0) \exp\left(-\frac{kA}{mcl}t\right) = (T_{\max} - T_0) \exp(-\omega t). \quad (18)$$

对于某个特定的长脉冲激光能量在线装置而言,其 ω 就是确定的,因此只需对其任意一条温升曲线的下降段进行拟合即可确定,在已知脉冲宽度的条件下即可由(16)式确定热传导损失对总能量的影响,并对实验结果进行修正。

4 实验数据分析

利用一个全吸收能量测量装置对某长脉冲激光能量在线测量装置 JC2000B 进行现场标校,其光路布局如图 3 所示^[1]。

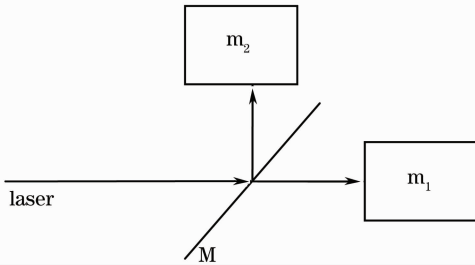


图 3 测量光路布局示意图

Fig. 3 Schematic of measurement arrangement

图中 m_1 为长脉冲激光能量在线装置, m_2 为全吸收能量测量装置, M 为分光镜,其中全吸收能量测量装置的测量不确定度为 8% ($k=2$), M 的透射率小于 1%,测得的部分实验数据如表 1 所示(表 1 中 c_1 已经经过归一化处理)。

表 1 实验数据

Table 1 Experiment data

No.	Pulse length /s	c_1
1	2.08	0.697
2	5.08	0.723
3	8.06	0.743
4	10.08	0.753

由于 c_1 反映了能量测量装置测量值与真实值之间的关系,而且脉冲宽度变化造成的影响比其他量影响大得多,因此 c_1 随脉冲宽度的变化即可反映热损失对测量结果的影响。对表 1 中的系数 c_1 进行拟合,拟合曲线如图 4 所示^[10]。

由图 4 可以看出拟合后的曲线斜率 $u' = 0.007$ 。对表 1 的 4 组数据中温升曲线下降段分别进行拟合后的曲线如图 5 所示^[10]。

由图 5 的拟合曲线可以得到衰减系数 $\omega = 0.0135$,偏差为 $\pm 0.74\%$,将 ω 代入(16)式,并设脉宽为 1s 时, $u = 0.0068$,即在不补偿的情况下,脉宽

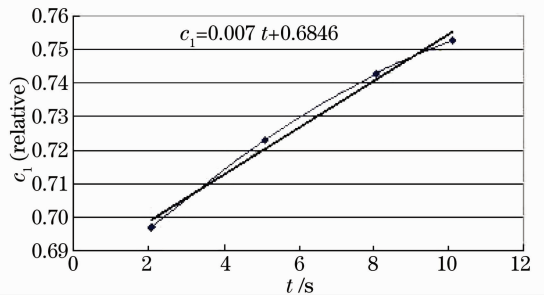


图 4 c_1 和 t 的拟合曲线

Fig. 4 Simulation figure between c_1 and t

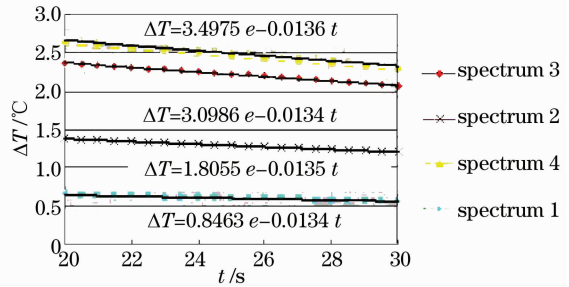


图 5 ΔT 和 t 的拟合曲线

Fig. 5 Simulation figure between ΔT and t

每增加 1s,测得的能量将偏小 0.68%。将 u 值与 c_1 拟合后的斜率 u' 比较可以发现,两者符合得较好, u 仅比 u' 偏小 2.9%。

图 6 为另一个长脉冲能量在线测量装置 MC500 所测数据中温升曲线下降段拟合曲线。

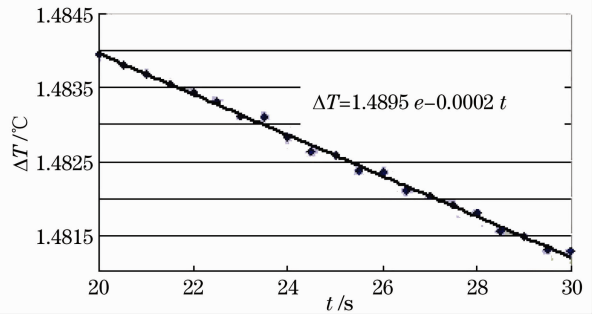


图 6 测量装置 MC500 的 ΔT 和 t 拟合曲线

Fig. 6 Simulation figure between ΔT and t of measurement device MC500

由图 6 中的拟合曲线可以得到 $\omega = 0.0002$,设脉宽为 1s 时, $u = 0.0001$,即脉冲宽度增加 100 s,所测能量偏小 1%。可以看出 MC500 基本上不受脉冲宽度影响,因此在激光能量在线测量装置设计中需综合考虑各种应用需求,并调整 ω 中各参数。

5 结 论

在长脉冲激光能量测量装置中,热桥的存在加剧了热传导的影响,当脉冲宽度增大时测量结果必

然会偏小。将温升曲线分成 3 部分,利用傅里叶定律、热传导方程及能量守恒定律对每一部分逐一进行分析,可以看出损失的能量占总能量的比例与脉冲宽度、导热系数、热桥截面积成正比,与吸收体的质量、比热及热桥的长度成反比,因此在装置的设计过程中需要综合考虑实验间隔和装置的精度要求,使其达到最佳。利用两套能量在线测量装置分别进行了实验验证,通过对下降段及标定系数的拟合结果的分析表明理论值与实验值具有较好的一致性,其偏差仅为 2.9%。

参 考 文 献

- 1 Wei Jifeng, Zhang Kai, Qian Shaosheng *et al.*. Evaluation of uncertainty in online energy measurement of high energy-laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7): 1102~1106
魏继锋, 张 凯, 钱绍圣等. 高能激光能量在线测试中的不确定度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7): 1102~1106
- 2 Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhou Shan *et al.*. Online calibration methods for high energy laser energy measurement equipment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2399~2403
魏继锋, 关有光, 周 山等. 高能激光能量测量装置现场标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2399~2403
- 3 Wei Jifeng, Zhang Kai, Zhou Shan. Research on calibration of high-energy-laser calorimeter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11): 1798~1802
魏继锋, 张 凯, 周 山. 高能激光能量计溯源问题研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(11): 1798~1802
- 4 Su Yi, Wan Min. *High Energy Laser System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004
苏 毅, 万 敏. *高能激光系统* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 5 Yu Jing. Study on the watt-level primary standard for laser power [J]. *Advanced Measurement*, 1998, **23**(1): 38~41
于 靖. 瓦级激光功率基准器研究[J]. *现代计量测试*, 1998, **23**(1): 38~41
- 6 Hu Juntao, Liu Xiang, Zhang Guoyong *et al.*. A real-time energy meter for medical excimer laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1732~1735
胡俊涛, 刘 翔, 张国勇等. 眼科准分子激光实时监控能量计 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1732~1735
- 7 F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* [M]. Chemical Industry Publishing, 2007
- 8 Zhang Fang, Liu Wenyao, Li Lei *et al.*. Application of heat conduction equation in phase extraction of speckle fringe pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1475~1479
张 芳, 刘文耀, 李 磊等. 热传导方程在散斑条纹图相位提取中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1475~1479
- 9 Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping *et al.*. Research on temperature characteristics of absolute calorimetric energy meter for high-energy laser [J]. *Applied Optics*, 2005, **26**(5): 14~16
王 雷, 杨照金, 黎高平等. 绝对式高能激光能量计温度特性研究[J]. *应用光学*, 2005, **26**(5): 14~16
- 10 Li Dawei, Zhao Yuan'an, He Hongbo *et al.*. Exponential fitting of laser damage threshold and analysis of testing errors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 273~275
李大伟, 赵元安, 贺洪波等. 光学元件激光损伤阈值的指数拟合法以及测试误差分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 273~275